

ANALISIS SENSITIVITAS PRODUKTIVITAS ALAT BERAT TERHADAP FAKTOR CUACA DAN KONDISI JALAN DI AREA TAMBANG

(SENSITIVITY ANALYSIS OF HEAVY EQUIPMENT PRODUCTIVITY TO WEATHER FACTORS AND ROAD CONDITIONS IN THE MINING AREA)

Noveriady^{1*}, Wilmar Gabriel Mardongan Sinaga¹, Alexander Sinaga¹

¹ Jurusan/Prodi Teknik Pertambangan, Universitas Palangka Raya

* Korespondensi E-mail: noveriady@mining.upr.ac.id

Abstrak

Produktivitas alat gali muat dan angkut merupakan faktor utama penentu keberhasilan operasi tambang batubara, namun sering terhambat oleh faktor eksternal seperti cuaca dan kualitas jalan. Penelitian di Pit SM-A PT XYZ, Kalimantan Timur ini menganalisis pengaruh curah hujan dan variasi kondisi jalan terhadap kinerja excavator dan *dump truck*. Dengan menggunakan data sekunder, dilakukan analisis sensitivitas untuk membandingkan kinerja alat pada kondisi cuaca cerah dan hujan, serta pada jalan kering, berdebu, licin, dan berlumpur. Simulasi produktivitas juga dilakukan dengan memvariasikan *cycle time* dan efisiensi kerja sesuai skenario tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan curah hujan memperpanjang *cycle time dump truck* hingga 15,6% dan menurunkan efisiensi kerja excavator hingga 12,7%. Dampaknya, produktivitas excavator menurun sebesar 5,0-16,5% dan *dump truck* menurun sebesar 2,8- 13,1%. Kondisi jalan basah dan berlumpur menjadi faktor dominan penurunan kinerja karena memperlambat kecepatan angkut dan memperpanjang waktu siklus. Simulasi menegaskan bahwa produktivitas maksimal dicapai pada cuaca cerah dengan jalan kering, sedangkan hujan lebat dengan jalan berlumpur menciptakan kondisi paling kritis. Oleh karena itu, pengelolaan jalan angkut yang baik serta strategi operasi yang adaptif terhadap cuaca sangat diperlukan untuk menjaga efisiensi dan keberlanjutan operasi penambangan.

Kata kunci: Alat angkut, curah hujan, *cycle time*, kondisi jalan angkut, produktivitas

Abstract

The productivity of loading and hauling equipment is a key factor determining the success of coal mining operations, yet it is often constrained by external factors such as weather and road quality. This study, conducted at Pit SM-A PT XYZ in East Kalimantan, analyzes the effects of rainfall and road condition variations on the performance of excavators and dump trucks. Using secondary data, a sensitivity analysis was carried out to compare equipment performance under clear and rainy weather, as well as on dry, dusty, slippery, and muddy roads. Productivity simulations were also performed by varying cycle time and work efficiency according to these scenarios. The results indicate that increased rainfall extends dump truck cycle time by up to 15.6% and reduces excavator work efficiency by up to 12.7%. Consequently, excavator productivity decreases by 5.0-16.5%, while dump truck productivity decreases by 2.8-13.1%. Wet and muddy road conditions are identified as the dominant factor in performance decline, as they slow down hauling speed and prolong cycle time. The simulations confirm that maximum productivity is achieved under clear weather with dry roads, whereas heavy rainfall combined with muddy roads creates the most critical conditions. Therefore, effective haul road management and adaptive operational strategies to weather conditions are essential to maintain efficiency and sustainability in mining operations.

Keywords: Hauling equipment, rainfall, cycle time, haul road conditions, productivity

1. Pendahuluan

Operasi penambangan batubara pada tambang terbuka, sebagai tulang punggung pasokan energi global, sangat bergantung pada efisiensi dan kinerja optimal alat berat. Secara spesifik, keberhasilan pencapaian target produksi harian sangat ditentukan oleh produktivitas alat gali muat (seperti excavator dan backhoe loader) dan alat angkut (terutama *dump truck*).

Produktivitas kedua jenis alat ini tidak hanya berkorelasi langsung dengan volume material yang dipindahkan, tetapi juga memengaruhi biaya operasional secara signifikan (Suryanto, 2018). Namun, realitas operasional di lapangan seringkali memperlihatkan adanya disparitas antara potensi produktivitas teoritis dengan pencapaian aktual. Fenomena ini sebagian besar disebabkan oleh paparan alat berat terhadap berbagai faktor

eksternal yang kompleks dan cenderung sulit untuk dikendalikan sepenuhnya. Seperti yang diidentifikasi oleh Hartman (2002) dan Tenriajeng (2003), kinerja alat berat dapat terdegradasi secara substansial oleh kondisi cuaca yang fluktuatif dan kualitas jalan angkut yang bervariasi, yang keduanya merupakan karakteristik umum dalam lingkungan tambang batubara.

Efisiensi dan profitabilitas operasi pertambangan sangat dipengaruhi oleh kinerja alat berat, yang pada gilirannya rentan terhadap berbagai variabel lingkungan dan operasional (Meneses-Rodríguez & Sepúlveda, 2023). Secara khusus, faktor-faktor seperti kondisi cuaca buruk, termasuk salju berlebih, serta karakteristik fisik jalan angkut, berpengaruh signifikan terhadap pemanfaatan alat dan produktivitas keseluruhan dalam pekerjaan pemindahan tanah (Fahmi & Ghuzdewan, 2023). Analisis ini bertujuan untuk mengukur sensitivitas produktivitas alat berat terhadap faktor-faktor tersebut, sekaligus memberikan wawasan penting bagi perencanaan operasional dan mitigasi risiko di sektor pertambangan (Meneses-Rodríguez & Sepúlveda, 2023). Pemahaman yang mendalam mengenai keterkaitan ini sangat penting untuk mengoptimalkan proses penggalian dan pengangkutan, yang merupakan komponen krusial dalam operasi tambang terbuka (Bodziony et al., 2025; Manyele, 2017). Sebagai contoh, ukuran fragmentasi yang kurang optimal akibat kegiatan pengeboran dan peledakan dapat berdampak negatif terhadap pemanfaatan alat dan waktu siklus pemuatan, sehingga menurunkan produktivitas secara keseluruhan (Deressa & Choudhary, 2024). Selain itu, kerusakan berkelanjutan pada jalan tambang akibat penggunaan yang intensif secara langsung memengaruhi resistansi gulir, yang berujung pada penurunan produktivitas dan peningkatan konsumsi bahan bakar dalam operasi pengangkutan (Meneses-Rodríguez & Sepúlveda, 2023). Hal ini menegaskan pentingnya perencanaan yang cermat serta pemeliharaan berkelanjutan terhadap jalan angkut untuk menjaga kinerja optimal dan meminimalkan biaya operasional yang terkait dengan penggunaan alat berat di lingkungan pertambangan (Bodziony et al., 2025).

Anomali cuaca, khususnya peningkatan intensitas curah hujan, telah lama dikenali sebagai musuh utama kelancaran operasi tambang terbuka. Hujan lebat yang berkepanjangan dapat mengubah permukaan jalan tambang yang semula kokoh menjadi medan yang licin, tergenang air, atau bahkan berlumpur tebal. Kondisi ini secara drastis memperlambat laju operasional truk dump, meningkatkan gesekan, memperbesar rolling resistance, dan secara inheren memperpanjang

waktu edar (*cycle time*). Fenomena perlambatan ini tidak hanya menurunkan efisiensi pengangkutan material, tetapi juga meningkatkan risiko kecelakaan kerja akibat hilangnya traksi dan kontrol kemudi (Rustiadi, 2015). Di sisi lain, pada periode musim kemarau yang panjang, muncul tantangan berbeda dalam bentuk debu. Konsentrasi debu yang tinggi di udara tidak hanya mengganggu kenyamanan dan kesehatan operator, tetapi juga berpotensi mengurangi visibilitas secara signifikan, serta mempercepat laju keausan komponen vital pada mesin dan sistem hidrolik alat berat, yang pada akhirnya meningkatkan biaya perawatan dan downtime (Wibowo, 2019).

Selain tantangan yang ditimbulkan oleh cuaca, kondisi jalan angkut itu sendiri memegang peranan krusial dalam menentukan efektivitas operasional alat. Jalan angkut yang tidak memenuhi standar teknis, baik dari segi kemiringan yang berlebihan, lebar jalur yang tidak memadai untuk manuver aman, maupun permukaan yang kasar dan tidak rata, akan secara langsung membatasi kecepatan gerak alat, menambah beban kerja mesin, dan meningkatkan konsumsi bahan bakar. Kondisi jalan yang buruk juga meningkatkan potensi kerusakan undercarriage (seperti track, roller, sprocket, dan idler) dan sistem suspensi, yang berkontribusi pada peningkatan biaya operasional dan frekuensi perbaikan (Mekel, 2011). Interaksi sinergis antara kualitas jalan dan karakteristik material penutup jalan (misalnya, tanah lempung yang mudah menjadi berlumpur saat basah) dapat memperparah dampak negatifnya.

Meskipun berbagai penelitian terdahulu telah secara individual mengkaji dampak faktor cuaca atau kondisi jalan terhadap performa alat berat, studi yang secara komprehensif menganalisis sensitivitas produktivitas alat gali muat dan alat angkut terhadap interaksi dinamis antara kedua faktor tersebut masih tergolong terbatas, khususnya dalam konteks operasional tambang batubara Indonesia yang memiliki karakteristik geologis dan hidrologis unik. Keterbatasan literatur ini menciptakan sebuah celah penelitian yang signifikan, terutama mengingat besarnya potensi kerugian ekonomi yang dapat ditimbulkan oleh inefisiensi operasional akibat faktor-faktor tersebut. Tren peningkatan produksi batubara yang didorong oleh permintaan global, ditambah dengan tantangan operasional yang dihadapi perusahaan tambang, menegaskan urgensi untuk memahami dan mengukur secara kuantitatif sejauh mana cuaca dan kondisi jalan memengaruhi produktivitas alat.

Oleh karena itu, penelitian ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan mendesak untuk

mengisi kesenjangan pengetahuan tersebut. Fokus utama studi ini adalah melakukan analisis mendalam terhadap sejauh mana faktor cuaca (khususnya curah hujan) dan kondisi jalan (termasuk aspek kebasahan, kekeringan, dan kualitas permukaan) secara simultan atau terinteraksi memengaruhi *cycle time* dan produktivitas alat gali muat dan alat angkut di area Pit SM-A PT XYZ. Dengan mengidentifikasi dan mengukur pengaruh relatif dari variabel-variabel kunci ini, penelitian ini bertujuan untuk memberikan landasan ilmiah yang kuat bagi pengembangan strategi mitigasi yang efektif dan berbasis data. Hasil simulasi yang dihasilkan diharapkan dapat memberikan rekomendasi praktis yang dapat diterapkan oleh manajemen PT XYZ untuk mengoptimalkan kinerja operasional, meminimalkan kerugian akibat downtime dan inefisiensi, serta meningkatkan efektivitas biaya produksi batubara.

Tujuan penelitian ini dirumuskan secara spesifik sebagai berikut:

- a Mengukur secara kuantitatif pengaruh intensitas curah hujan terhadap parameter *cycle time* dan produktivitas operasional alat gali muat dan alat angkut.
- b Menganalisis dampak variasi kondisi jalan, meliputi kondisi licin akibat basah, kondisi berdebu saat kering, dan tingkat kekeringan permukaan jalan, terhadap efisiensi operasional alat angkut.
- c Mensimulasikan skenario produktivitas alat berat di bawah kombinasi berbagai kondisi cuaca dan kondisi jalan yang mungkin terjadi di Pit SM-A untuk mengidentifikasi titik-titik kritis kerentanan operasional.

2. Metode

Data yang digunakan pada penelitian ini diambil pada bulan Juli hingga Agustus 2025, berlokasi spesifik di Pit SM-A PT XYZ, Kalimantan Timur. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada representasi tipikal kondisi operasional tambang batubara di wilayah tersebut, yang memungkinkan

generalisasi temuan penelitian. Sebagaimana diuraikan oleh Creswell dan Creswell (2018), pemilihan lokasi dan rentang waktu pelaksanaan penelitian yang tepat merupakan elemen krusial dalam mendefinisikan ruang lingkup dan batasan studi empiris. Adapun data yang digunakan dalam penulisan ini merupakan data sekunder yang dikumpulkan dari catatan operasional perusahaan, meliputi produktivitas alat gali muat dan angkut, estimasi *cycle time* operasional, data pencatatan cuaca harian, serta kondisi jalan angkut. Penggunaan data sekunder ini sejalan dengan praktik yang lazim dalam studi operasional pertambangan, di mana data historis seringkali menjadi sumber primer untuk analisis produktivitas dan efisiensi (Sugiyono, 2019).

Analisis sensitivitas merupakan salah satu instrumen utama dalam studi ini untuk mengukur dampak variabilitas kondisi lingkungan terhadap kinerja operasional. Hal ini dilakukan dengan membandingkan produktivitas dan *cycle time* pada dua skenario curah hujan yang kontras: hari dengan curah hujan tinggi (>20 mm) yang berpotensi menyebabkan kelicinan dan penurunan mobilitas, serta hari dengan curah hujan rendah (<5 mm) yang merepresentasikan kondisi ideal. Selain itu, analisis juga mempertimbangkan efek dari kondisi jalan angkut yang bervariasi, yaitu jalan licin, berdebu, dan kering, untuk mendapatkan gambaran yang komprehensif mengenai pengaruhnya terhadap efisiensi waktu tempuh dan kapasitas angkut (Neuman, 2014). Lebih lanjut, simulasi produktivitas dilakukan dengan memvariasikan parameter kunci seperti nilai *cycle time* dan tingkat efisiensi kerja, yang kemudian dievaluasi berdasarkan skenario cuaca dan kondisi jalan yang telah diidentifikasi. Pendekatan simulasi ini memungkinkan eksplorasi berbagai kemungkinan operasional dan identifikasi titik kritis yang dapat menjadi fokus perbaikan kebijakan manajemen (Kerlinger & Lee, 2000). Adapun diagram alir penelitian dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

Pengaruh Curah Hujan terhadap *Cycle time* dan Produktivitas

Berdasarkan data curah hujan bulan Juli, pada tabel 1 menunjukkan pengaruh kondisi curah hujan terhadap kinerja alat gali-muat (excavator) dan alat angkut (*dump truck*). Pada kondisi cerah dengan jalan kering (Hari ke-1 dan ke-4), produktivitas excavator berada pada kisaran 265,0–278,6 ton/jam, sedangkan produktivitas *dump truck* mencapai 34,8–35,4 ton/jam dengan *cycle time* relatif singkat, yaitu sekitar 44,3–45,5 menit. Kondisi ini menunjukkan operasi berjalan optimal karena tidak ada hambatan akibat cuaca dan kondisi jalan yang baik.

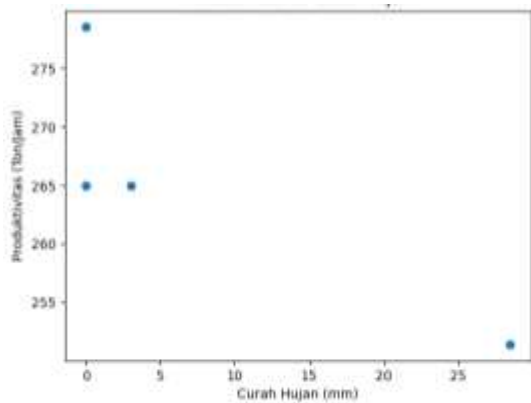
Sebaliknya, pada kondisi hujan (Hari ke-2 dan ke-3), terutama saat curah hujan tinggi 28,5 mm, terjadi penurunan produktivitas baik pada excavator maupun *dump truck*. Produktivitas

excavator turun hingga 251,4 ton/jam, sementara produktivitas *dump truck* menurun menjadi 32,1 ton/jam. Pada saat yang sama, *cycle time dump truck* meningkat signifikan hingga 51,2 menit, yang disebabkan oleh jalan licin, kecepatan angkut yang lebih rendah, serta peningkatan waktu manuver dan kehati-hatian operator.

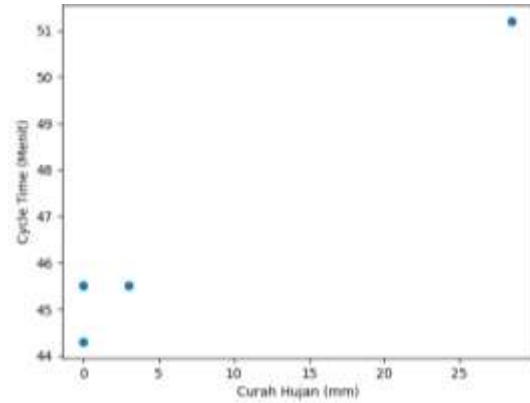
Secara rerata, kondisi hujan menghasilkan produktivitas excavator 258,2 ton/jam dan *dump truck* 34,1 ton/jam, dengan *cycle time* 48,4 menit. Jika dibandingkan dengan kondisi cerah, produktivitas excavator mengalami penurunan sekitar 5,0%, produktivitas *dump truck* turun 2,8%, dan *cycle time dump truck* meningkat sebesar 7,8%. Hal ini menegaskan bahwa curah hujan berpengaruh negatif terhadap efisiensi operasi pemindahan tanah, terutama melalui peningkatan waktu siklus dan penurunan produktivitas alat.

Tabel 1. Perbandingan Produktivitas Alat pada Hari dengan Curah Hujan Berbeda

Data Harian	Curah Hujan (mm)	Produktivitas Excavator (Ton/Jam)	Produktivitas <i>Dump truck</i> (Ton/Jam)	Cycle time DT (Menit)	Keterangan
1	0.0	278.6	34.8	44.3	Cerah, jalan kering
2	28.5	251.4	32.1	51.2	Hujan, jalan licin
3	3.0	265.0	36.0	45.5	Hujan ringan
4	0.0	265.0	35.4	45.5	Cerah, jalan kering
Rerata Hujan	15.8	258.2	34.1	48.4	-
Rerata Cerah	0.0	271.8	35.1	44.9	-
Selisih (%)	-	-5.0%	-2.8%	+7.8%	-



Gambar 2. Produktivitas vs Curah Hujan



Gambar 3. Cycle vs Curah Hujan

Berdasarkan gambar 2, produktivitas alat gali muat juga terdampak secara signifikan oleh kondisi cuaca hujan, pada hari-hari dengan curah hujan, delay time (waktu tunda operasional) excavator meningkat dari rata-rata 9,18 menit per jam menjadi 13 menit per jam. Peningkatan waktu tunda ini, yang mencapai sekitar 41,7% dari kondisi normal, secara langsung berkorelasi dengan penurunan efisiensi kerja alat dari 63% menjadi 58%. Penurunan efisiensi sebesar 5% ini, meskipun terkesan kecil, berdampak kumulatif pada produktivitas teoritis alat gali muat yang berkurang rata-rata sekitar 8-15%, tergantung pada intensitas hujan yang mempengaruhi kondisi lapangan dan operasional.

Berdasarkan gambar 3, pada kondisi hujan, *cycle time* alat angkut meningkat rata-rata dari 45,50 menit menjadi 51,20 menit (naik 12.5%). Hal ini disebabkan oleh penurunan kecepatan kendaraan akibat jalan licin dan peningkatan waktu manuver di loading point dan dumping point.

Dampak Kondisi Jalan terhadap Operasional Alat Angkut

Kondisi jalan tambang yang licin dan berdebu diamati secara visual dan dilaporkan oleh operator. Jalan berdebu mengurangi visibilitas hingga 30%, memaksa operator mengurangi kecepatan dari rata-rata 30 km/jam menjadi 20–25 km/jam. Akibatnya, waktu angkut bertambah 15–18%.

Tabel 2. Pengaruh Kondisi Jalan terhadap Parameter Operasional *Dump truck*

Kondisi Jalan	Kecepatan Rata-rata (km/jam)	Waktu Angkut (menit)	Tambahan Cycle time	Visibilitas	Produktivitas Relatif
Kering/Baik	30-35	18.2	-	100%	100% (baseline)
Berdebu	20-25	21.4	+17.6%	60-70%	92-95%
Licin (setelah hujan)	15-20	23.1	+26.9%	80-90%	88-90%
Basah/Ber lumpur	10-15	26.8	+47.3%	70-80%	80-85%

Tabel 2 menggambarkan pengaruh kondisi jalan angkut terhadap kecepatan operasional, waktu angkut, dan produktivitas relatif alat angkut.

Pada kondisi jalan kering dan baik, kecepatan rata-rata *dump truck* berada pada kisaran 30–35 km/jam dengan waktu angkut 18,2 menit, yang

dijadikan sebagai kondisi acuan (baseline) dengan produktivitas dan visibilitas optimal, masing-masing sebesar 100%. Kondisi ini memungkinkan operasi berjalan efisien tanpa hambatan signifikan.

Pada kondisi jalan berdebu, kecepatan rata-rata menurun menjadi 20–25 km/jam sehingga waktu angkut meningkat menjadi 21,4 menit atau terjadi penambahan *cycle time* sebesar 17,6%. Penurunan visibilitas hingga 60–70% menyebabkan operator mengurangi kecepatan demi keselamatan, yang berdampak pada penurunan produktivitas relatif menjadi 92–95% dibandingkan kondisi ideal. Selanjutnya, pada kondisi jalan licin setelah hujan, kecepatan operasi semakin menurun ke kisaran 15–20 km/jam dengan waktu angkut 23,1 menit. Kondisi ini menyebabkan kenaikan *cycle time* sebesar 26,9% akibat meningkatnya risiko slip dan kebutuhan pengereman yang lebih hati-hati, meskipun visibilitas masih relatif baik (80–90%). Dampaknya, produktivitas relatif turun menjadi 88–90%. Kondisi terburuk ditunjukkan pada jalan basah atau berlumpur, di mana kecepatan rata-rata hanya 10–15 km/jam dan waktu angkut meningkat signifikan hingga 26,8 menit, atau penambahan *cycle time* sebesar 47,3%. Selain hambatan

mekanis akibat lumpur, visibilitas yang hanya 70–80% semakin membatasi kelancaran operasi. Akibatnya, produktivitas relatif menurun tajam menjadi 80–85%, menunjukkan bahwa kondisi jalan merupakan faktor kritis dalam menentukan efisiensi sistem angkut tambang.

Simulasi Produktivitas pada Berbagai Skenario

Simulasi dilakukan dengan memasukkan variasi *cycle time* dan efisiensi kerja berdasarkan kondisi cuaca dan jalan, sebuah pendekatan krusial dalam analisis sensitivitas produktivitas alat berat terhadap faktor cuaca dan kondisi jalan di area tambang. Temuan dari simulasi ini memberikan gambaran kuantitatif mengenai sejauh mana fluktuasi dalam parameter operasional, seperti waktu siklus penambangan dan tingkat efisiensi tenaga kerja atau mesin, dapat memengaruhi keluaran produktivitas. Variasi *cycle time* yang diperhitungkan mencakup rentang yang representatif terhadap situasi operasional normal hingga kondisi yang menantang, demikian pula dengan efisiensi kerja yang disesuaikan untuk mencerminkan dampak langsung dari faktor eksternal.

Tabel 3. Simulasi Produktivitas Berdasarkan Skenario Cuaca dan Kondisi Jalan

Skenario	Kondisi Cuaca	Kondisi Jalan	Cycle time Excavator (detik)	Cycle time DT (menit)	Efisiensi Excavator	Efisiensi DT	Produktivitas Excavator (Ton/Jam)	Produktivitas DT (Ton/Jam)
Optimal	Cerah	Kering/Baik	20.07	44.3	63%	84%	290.24	36.68
Normal	Cerah	Sedang/Berdebu	21.15	45.5	60%	83%	265.01	35.36
Hujan Ringan	Hujan (<10 mm)	Licin	21.15	47.0	58%	82%	254.55	34.11
Hujan Lebat	Hujan (>20 mm)	Basah/Lumpur	22.22	51.2	55%	80%	242.22	31.89
Penurunan Maksimal	-	-	+10.7%	+15.6%	-12.7%	-4.8%	-16.5%	-13.1%

Tabel 3. tersebut menunjukkan bahwa *cycle time*, efisiensi kerja, dan produktivitas alat pada tambang terbuka sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan kondisi jalan angkut. Pada kondisi optimal (cuaca cerah dan jalan kering), *cycle time* excavator dan *dump truck* berada pada nilai terendah sehingga efisiensi kerja dan produktivitas mencapai kondisi maksimum. Namun, seiring memburuknya cuaca dari cerah hingga hujan lebat, *cycle time* excavator meningkat hingga 10,7% dan *cycle time dump truck* hingga 15,6%, yang diikuti penurunan efisiensi kerja excavator sebesar 12,7% dan *dump truck* 4,8%. Peningkatan *cycle time* ini disebabkan oleh penurunan kecepatan operasi, kehati-hatian operator, serta kondisi jalan yang licin hingga berlumpur. Dampaknya, produktivitas excavator dan *dump truck* menurun masing-masing hingga 16,5% dan 13,1%, menegaskan bahwa faktor cuaca dan kualitas jalan angkut merupakan variabel kunci yang harus dikendalikan dalam perencanaan dan evaluasi kinerja sistem pemindahan material pada

tambang terbuka.

4. Simpulan

Berdasarkan hasil analisis data aktual dan simulasi, dapat disimpulkan bahwa curah hujan dan kondisi jalan angkut berpengaruh signifikan terhadap *cycle time*, efisiensi kerja, dan produktivitas alat gali-muat dan alat angkut pada tambang terbuka. Peningkatan curah hujan menyebabkan kondisi jalan menjadi licin hingga berlumpur, yang berdampak langsung pada penurunan kecepatan operasi, peningkatan waktu manuver, dan kehati-hatian operator. Secara kuantitatif, kondisi hujan meningkatkan *cycle time dump truck* hingga 7,8–15,6%, menurunkan efisiensi kerja excavator hingga 12,7%, dan menyebabkan penurunan produktivitas sebesar 5,0–16,5% pada excavator serta 2,8–13,1% pada *dump truck*. Simulasi skenario operasional menunjukkan bahwa kondisi optimal dengan cuaca cerah dan jalan kering menghasilkan produktivitas maksimum, sedangkan kondisi hujan

lebat dan jalan berlumpur merupakan faktor pembatas utama kinerja sistem pemindahan material. Oleh karena itu, pengendalian kualitas jalan tambang dan penerapan strategi operasional

adaptif terhadap cuaca menjadi langkah penting untuk meminimalkan kehilangan produktivitas dan menjaga efisiensi operasi penambangan.

Daftar Pustaka

- Bodziony, P., Krysa, Z., & Patyk, M. 2025. Operational Environment Effects on Energy Consumption and Reliability in Mine Truck Haulage. *Energies*, 18(12), 3022.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. 2018. *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.
- Deressa, G. W., & Choudhary, B. S. 2025. Evaluating Productivity in Opencast Mines: A Machine Learning Analysis of Drill-Blast and Surface Miner Operations: GW Deressa and BS Choudhary. *Natural Resources Research*, 34(1), 215-251.
- Fahmi, M., & Ghuzdewan, T. A. 2023. Productivity analysis PC-300 and PC-400 in earthworks at a gold mining project in Indonesia. In *Journal of the Civil Engineering Forum* (Vol. 9, No. 3, pp. 343-356).
- Hartman, H. L. 2002. *SME mining engineering handbook* (3rd ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Kerlinger, F. N., & Lee, H. B. 2000. *Foundations of behavioral research* (4th ed.). Harcourt College Publishers.
- Manyele, S. V. 2017. Investigation of excavator performance factors in an open-pit mine using loading *cycle time*. *Engineering*, 9(07), 599-624.
- Mekel, R. 2011. Analisis pengaruh kondisi jalan tambang terhadap produktivitas alat angkut (studi kasus: tambang batubara PT Adaro Indonesia) [Skripsi, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta].
- Meneses, D., & Sepúlveda, F. D. 2023. Modeling productivity reduction and fuel consumption in open-pit mining trucks by considering the temporary deterioration of mining roads through discrete-event simulation. *Mining*, 3(1), 96-105.
- Neuman, W. L. 2014. *Social research methods: Qualitative and quantitative approaches* (7th ed.). Pearson.
- Rustiadi, E. 2015. *Manajemen sumber daya lahan*. Yayasan Pustaka Obor Indonesia.
- Sugiyono. 2019. *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D* (2nd ed.). Alfabet
- Suryanto, D. 2018. Analisis produktivitas alat gali muat dan alat angkut pada tambang terbuka batubara. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 14(2), 100-115.
- Tenriajeng, A. T. 2003. *Produksi tanaman tambang*. Pustaka Widyatama.
- Wibowo, A. S. 2019. Dampak debu tambang terhadap kesehatan dan keausan alat. *Jurnal Lingkungan Pertambangan*, 7(1), 45-58.